炭素鋼の切削における工具寿命について

竹 山 秀 彦* 村 田 良 司*

Study on Tool Life in Turning Carbon Steels

Hidehiko TAKEYAMA, Ryoji MURATA

The relations between tool life, cutting temperature, mechanical properties of the work materials are experimentally analyzed.

Annealed and normalized plain carbon steels, of which carbon contents are varied from 0.15 % to 0.55 % are turned with carbide tools.

For the aforementioned purpose, only normal or regular type of tool wear is taken into consideration for the tool life criteria.

The major findings are as follows.

(1) Under the fixed condition of work material and tool, the tool life can be defined by one variable function of cutting temperature.

(2) Under the fixed cutting condition of cutting speed, feed per revolution and depth of cut, the tool life is closely related with Brinell hardness H_B , and ultimate strain of the shear test γ_u .

(3) The relationships between tool life equation and mechanical properties of the work materials are as follows.

$$V \cdot T^n \exp(\delta \cdot f) d^p = C$$

$$n \propto H_B^{0.23} \cdot \gamma_u^{0.22}$$

$$\delta \propto H_B^{-1.01} \cdot \gamma_u^{-0.29}$$

$$C \propto H_B^{-1.36} \cdot \gamma_u^{-0.145}$$

where, V = cutting speed, m/min,

f = feed per revolution, mm/rev,

d = depth of cut, mm.

Because, it is very difficult to vary said variables independently each other, they are not independent from a physical point of view.

However, the relationships can be derived mathematically, by means of a unique analytical method.

1. 緒 言

工具の寿命に関する論文や報告はすでに多数¹⁾あるが、いずれもその特性を普遍的に解明しているとはいいいがたく、具体的事例との接続もつけにくい。これは現象が非常に複雑であり、寿命を定める要素がきわめて多いためと思われる。方法論的には、いかに要素が多くとも、おのおのの要素を独立に変化させることが容易にできるならば、その関数形を簡単に解明することができる。しかし実際にはこれらの要素の多くは独立ではないから、この点においても困難がある。

しかしながら、実験上においては工具寿命に関係する多くの変数を被削材、工具（広義に解釈して刃形、材質、支持剛性をも含める）、切削条件（切削諸元〔切削速度、送り、切込み〕、切削方式などを含む）の3種に分類して

考えると便利である。

この3種のうち、切削条件（ただし切削速度、送り、切込みの効果のみについて）の影響については一応の結論を得て、すでに報告した²⁾。

ここでは上記報告（耐熱鋼および鋳鉄についての結論）が炭素鋼についても成立するか否かを検討し、更に被削材の機械的諸性質と工具寿命との関係も実験的に追求して、その手掛りを得ようとするものである。

なおチップングのように著しく不規則な損耗を伴う場合については扱わない。したがって切削方式、切削諸元、寿命判定規準なども比較的規則的な摩耗が発生するように選定した。

2. 序 論

2.1 工具寿命の温度依存性

工具摩耗速度は工具の性能と摩耗面における広義の状

* 正会員 機械試験所

態(温度, 応力, 対向する物質などの諸条件)できまると考えられる。したがってある寿命判定基準における工具寿命 T はこれらの状態の関数である。

$$T = T(\theta, \sigma, M, \dots) \quad (1)$$

ただし θ は切削温度, σ は摩耗面の代表的応力, M は被削材のアクティビティを示す量とする。このとき被削材が一定で, 切削条件(切削速度 V , 送り f , 切込み d 等)が変化する場合を考える。 V, f, d によって変化する量は θ と σ であろうから, T に及ぼす効果は θ と σ のおのおのの変化によるものの複合された形になるはずである。しかし前出文献²⁾によれば, 比較的高速切削においては種々の工具摩耗機構のうち温度に支配されるものが主になるために摩耗速度あるいは寿命は切削温度 θ だけの関数になる。

$$T = T(\theta, \sigma_0, M_0, \dots) = T(\theta) \quad (1)'$$

これに対し切削条件一定で被削材が変化する場合を考えると, θ や σ の変化だけでなく摩耗面のミクロな性質, 組織的な性質, 化学的性質などが変わるため更に複雑になる。

2.2 工具寿命に関する諸関係

現在までに種々提案されている実験式のうちから代表的なものをあげ検討してみよう。

2.2.1 切削諸元(切削速度 V , 送り f , 切込み d)と工具寿命との間によく知られているように Taylor の実験式(寿命方程式)が成立する。

$$V \cdot T^n \cdot f^\alpha \cdot d^\beta = C \quad (2)$$

ただし, n, α, β, C はおのおの定数。

この関係は V, f および d の比較的広い範囲にわたり成立する。しかし n, α, β, C は工具, 切削方式, 被削材が変化するごとに新しく実験して定める必要がある。またべき関数の代わりに指数関数を用いた方が成立の範囲が広いこともある。

$$V \cdot T^n \cdot \exp(\delta \cdot f) \cdot d^\beta = C \quad (2)'$$

ただし δ は定数。

2.2.2 また被削材の機械的性質と工具寿命との関係については次の実験式が提唱されている³⁾。ある一定の標準条件(たとえば $T = T_0, f = f_0, d = d_0$)における許容切削速度 V_0 は,

$$\text{鋼材に関し } V_0 = K_1 \cdot \sigma_u \epsilon_1 \quad (3)$$

$$\text{鋳鉄に関し } V_0 = K_2 \cdot H_B \epsilon_2 \quad (3)'$$

ただし σ_u は抗張力, H_B はブリネルかたさであり, $K_1, K_2, \epsilon_1, \epsilon_2$ は工具および被削材できまる係数である。 ϵ_1, ϵ_2 の値はおおよそ $-1.1 \sim -1.5$ 程度である。この実験式には切削条件 V, f, d 等の変数がもられていないので, 標準条件以外のことなる条件における許容速度は

比較できない。したがってこの関係は直接には特定の条件下の工具寿命とは結びつかない。

2.2.3 切削諸元 V, f, d の影響とともに被削材の機械的性質の効果をも加味した実験式として海老原の式がある⁴⁾。

鋼材に関し, 直線刃バイト(高速度鋼)について許容速度 V_0 は,

$$V_0(\text{m/min}) = 37 \left(\frac{60}{T} \right)^{0.125} \cdot \left(\frac{60}{\sigma_u} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{45}{k} \right)^{0.585} \cdot \left(\frac{n}{5} \right)^{0.26} \cdot q^{-0.38} \quad (4)$$

ただし k はバイト取付角, n は断面係数(切込み d /送り f), q は切削面積(mm^2)である。

これを今問題にしている量だけで書きかえると

$$V \propto T^{-0.125} \cdot \sigma_u^{-1.5} \cdot d^{-0.12} \cdot f^{-0.64} \quad (4)'$$

となる。すなわち式(4)は式(2)の C の代わりに式(3)の右辺を用いた形式となり, 式(2), (3)を総合しているため多くの利点がある。しかし事実にはそぐわない点も多い。それは式(2)における各定数 α, β, n, C は, 実際には, 同一グループに属する被削材間においても大きく変化する事実を無視して, $\alpha = 0.64, \beta = 0.12, n = 0.125$ と一つにきめている点である。

2.2.4 したがって, もし切削諸元 V, f, d と被削材の効果を同時に表わすことが必要な場合には, 少なくとも式(2)の各定数がまた被削材の関数であるような実験式(式(5), (5)')でなければならない。

$$V \cdot T^{n(\sigma_B \cdot H_B \dots)} \cdot d^{\beta(\sigma_B \cdot H_B \dots)} \cdot f^{\alpha(\sigma_B \cdot H_B \dots)} = C(\sigma_B \cdot H_B \dots) \quad (5)$$

ただし $\sigma_B, H_B, \dots$ は被削材の各性質を示す。

または

$$V \cdot T^{n(\sigma_B \cdot H_B \dots)} \cdot d^{\beta(\sigma_B \cdot H_B \dots)} \cdot \exp\{f \cdot \delta(\sigma_B \cdot H_B \dots)\} = C(\sigma_B \cdot H_B \dots) \quad (5)'$$

3. 実験条件

3.1 被削材

被削材は JIS S15CK, S25C, S35C, S45C, S55C の5種類の炭素鋼とし, 熱処理状態は焼鈍および焼準とした。

表1, 2に計10種類の被削材の機械的性質, 化学成分(分析結果)をしるす。また参考までに図1に各被削材の組織写真をかかげる。

3.2 工 具

工具材質 超硬合金 FT1

工具刃形 (0, 5, 6, 6, 15, 15, 0.5)

S25CA

S35CN

S55CA

S15CN

S35CA

S45CN

S15CA

S25CN

S45CA

S55CN

図 1

表 1 被削材, 化学分析表

化学成分(%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
被削材								
S 15C K	0.13	0.29	0.46	0.013	0.01	0.11	0.06	0.20
S 25C	0.25	0.20	0.60	0.012	0.015	0.07	0.07	0.19
S 35C	0.38	0.34	0.57	0.017	0.009	0.09	0.09	0.17
S 45C	0.44	0.36	0.62	0.019	0.011	0.13	0.13	0.21
S 55C	0.52	0.26	0.65	0.017	0.011	0.17	0.13	0.16

表 2 被削材の機械的性質

被 削 材	降状点 kg/mm ²	抗張力 kg/mm ²	伸 び %	し ぼ り %	硬 度 ブリネル	シャルピー kgm/cm ²	
S 15C A					113		
S 15C N					113		
S 25C A	33.4	53.3	32.8	53.0	146	8.0	} 半径の中央部より試料採取
S 25C N	31.8	50.0	32.8	51.0	137	7.7	
S 35C A	33.8	58.0	28.0	43.7	152	6.0	
S 35C N	33.1	57.2	31.0	49.0	163	6.3	
S 45C A	34.4	65.0	25.4	40.5	179	4.2	
S 45C N							
S 55C A	32.1	65.9	21.6	33.7	187	3.5	} 半径の中央部より試料採取
S 55C N	42.2	73.1	20.6	34.8	201	3.7

図 2 逃げ面摩耗進行過程の概念図

研摩条件 # 150 ダイヤモンド砥石により仕上
 工具型式 JIS 31形2番, ただし切削温度測定の際には測定用の特殊シャンクを用いた

3.3 寿命の判定

切削試験における工具摩耗の経過は大略図 2 に示すようであり, 逃げ面摩耗幅 V_B が 0.4 mm 程度までは比較的規則的な摩耗を呈し, 不規則なチッピング等が起こるおそれが少ない。したがって寿命解析に便利ように $V_B=0.4$ mm をもって寿命判定基準とする。またすくい面摩耗で寿命を定める場合は, すくい面摩耗深さ K_T

図 3 ねじり試験片

が 0.05 mm に達するときを寿命ときめる。

3.4 測定項目

以上の条件をもって寿命試験(旋削, 円筒外丸削り)をするとともに各条件における切削温度を測定しこれに対応させる。また各被削材よりねじり試験片(ねじり径 6φ 図 3), 引張り試験片, 硬度試験片を採取して静的材料試験を行ない, 寿命試験の結果と対照した。

切削温度は工具被削材熱電対法(図 4)による。この方法には二, 三問題がないわけでもないが, 今のところほかに妥当な方法がない。

なお, 熱伝導により工具側冷接点の温度がしだいに上昇し, 熱起電力が見かけ上減少する。この効果をさけるため, 超硬チップをシャンクより電気的に絶縁しうのような特殊シャンク(図 5)を用い, 工具側冷接点をなるべく切削点(高温接点)よりとおぎけるように工夫した。

図4 温度測定の設定アップ

図5 熱起電力測定用特殊シャンク

このようにしてもなお継続して切削すると冷接点温度上昇はさけられない。しかし冷接点温度上昇が事実上起こらないうちに熱起電力の測定をすれば、そのために起こる誤差はさけられる。

この実験では直流増幅器とペンオシログラフを用い、敏速に測定を行ない、また一測定ごとにチップを交換して冷接点温度上昇の累積をさけた。

4. 実験結果

4.1 工具寿命の温度依存性 (切削条件の工具寿命への影響)

図6は切削速度および送りがいろいろに変化する場合の工具寿命と切削温度 θ ($^{\circ}\text{K}$)との関係を示す。これは10種類の被削材(炭素鋼)のうち

の1例であるが、他の被削材においても同様である。切削速度 V , 送り f を変化させた場合の寿命 T を示す測定点はほとんど1本の直線上に乗っている(ただしすくい面摩耗で寿命を規定した場合で、しかも同一の被削材にかぎる)。これは前記のように切削諸元 V, f, d だけの变化による効果は $T(\theta)$ だけで表わせることをうらづけている。しかし一方では、逃げ前摩耗で寿命を規定した場合(図7)にはやや測定点に散布があり、この関係を示す曲線は幅をもっている。この事情を明らかにするため図6, 7をかき変える(図8, 9)。つまり切削諸元 V, f をたて軸および横軸とし切削温度 θ と寿命 T をパラメータとする。この図で θ =一定と、 T =一定の2つの曲線群が完全に並行するならば寿命 T は1つの工具と被削材の系について、 θ だけの関数であるといえる。

図8, 9を見るとこの曲線群は、送りが小なる範囲($f < 0.2 \text{ mm/rev}$)を除き、きわめて良く相関していることがわかる。つまりこの範囲を除けば、炭素鋼においても前報のように切削温度のみで寿命が表わせるとしてもよいと思われる。

図6 切削温度と工具寿命との関係(すくい面摩耗寿命の場合)

被削材=S35C焼鈍, その他の条件は本文参照

図7 切削温度と工具寿命との関係(逃げ面摩耗寿命の場合)

被削材=S55C焼鈍, その他の条件は本文参照

図 8 工具寿命と切削温度の相関性
(逃げ面摩耗寿命)

被削材 = S35C 焼鈍

図 9 切削温度と工具寿命の相関性
(すくい面摩耗寿命)

被削材 = S45C 焼鈍

送りの小なる範囲で相関性のうすれる原因としては、このような場合には局部が選択的に摩耗する結果送りがか小くなるとかえて寿命が短くなる現象⁹⁾があること、あるいは摩耗機構が通常の場合とやや異なる、または工具・被削材熱電対の示す温度が真に摩耗に関与する部分の温度ではなくなるなどの理由があげられる。

また逃げ面摩耗寿命よりもすくい面摩耗寿命の方が温度依存性ははっきりしている(図6と図7を対比された)ことは両摩耗機構の内容の相違を示していると考えられる。

4.2 被削材の機械的性質と工具寿命

被削材の諸性質が寿命に与える効果を考える場合、機械的性質のほかにも、金属組織、化学的性質あるいは熱的性質(摩耗機構に対し切削温度が重要な意味をもっていることからして、熱伝導率などの切削温度をきめる要素のもつ意味は少なくない)なども重要であろう。しかし化学的性質などは数量的に扱いにくいし、またあらゆる要素を同時に扱うと焦点がぼけるので、これらの影響は今後の問題に残し、ここでは機械的性質についてだけ考える。

つまり似かよった一群の被削材(炭素鋼)に問題を限定し、この中では化学的性質などの相違は大きくないと仮定する。このような仮定は相当乱暴であるが、工具寿命のような性質の問題においては、厳密な数値よりも大要をつかむことが先決であり、それが良い参考になりうる。

さて機械的性質に限定しても、なお多くの種類の量がありうる。しかしこれらの量のうち特に切削現象に関連が深そうな量は次の8つである。つまり強さを表わす量としてブリネル硬さ H_B 、抗張力 σ_u 、破断せん断応力 τ_u 、延伸性を表わす量として、伸び率 ϵ_u 、せん断破壊ひずみ γ_u 、破壊に要するエネルギーを表わす量としてシャルピ値 S 、せん断破壊エネルギー E 、および切削温度を支配する⁹⁾量 $\tau_u \cdot \gamma_u^{1/2}$ を取りあげた。切削現象は高速高温下における摩擦を伴うせん断過程が主役を演ずるものであるから、材料試験もそのような条件下で行なえば理想的であろう。しかしそのような実験ができないこと、お

図 10 被削材かたさと工具寿命の関係

図 11 被削材の抗張力と工具寿命の関係

図 12 被削材のせん断破壊応力と工具寿命の関係

図 13 被削材の伸び ϵ_u と工具寿命との関係

図 14 被削材のせん断破壊ひずみと工具寿命との関係

よび得られた実験式を実用に供する場合の便宜を考え、これらの量として通常の静的材料試験の結果を用いる。

図 10~17 はおのおの、切削速度 $V=400$ m/min, 送り $f=0.4$ mm/rev, 切込み $d=1$ mm における寿命とこれらの量との関係である。

これらを見ると H_B , σ_u , τ_u , ϵ_u と寿命とは強い相関性が認められるのに対しその他の量とは相関性が明らかでない。各量は炭素含有量および熱処理を変えて間接にその値を変化させたため、必ずしも互いに独立でないことおよび測定点の数が少ないので、直ちにこれから H_B , σ_u , τ_u , ϵ_u 以外の量は寿命と無相関であるとは断定できない。しかし強い相関性を持つ量は独立でなくともなお

図 15 被削材のシャルビ値と工具寿命の関係

図 16 せん断破壊エネルギーと工具寿命との関係

大きな相関を表わし、独立でないために相殺されるような相関性はもともと小さいと見るのが自然であろう。したがって少なくとも H_B , σ_u , τ_u , ϵ_u 以外は強い支配性をもたない。また H_B と σ_u , τ_u と ϵ_u は同種かつ同傾向の量である。そこで第一近似として機械的諸性質の影響を H_B と τ_u で代表することができる。

そこで寿命方程式 (5) の各関数を決定してみよう。この際、変数 H_B , τ_u を独立に変化させれば関数形の決定は容易であるが、それはできない。すなわちある特定の熱処理条件では炭素鋼の H_B と τ_u との間には関数関係がある。したがってこのままでは式 (5) の各関数を求めることはできない。これを求めるためには何十種類

図 17 切削温度を支配する τ_u^2 , γ_u と寿命の関係

図 18 独立でない実験による二元関数の近似的決定法

もの熱処理条件についておのおの何種類かの被削材を用意して寿命試験をなし、そのデータのうちから、たとえば H_B が同一で τ_u のみ異なるデータを拾い出せばよい。しかしこのような計画はたいへんな労力、資材および費用を要し、とうてい採用できない。そこで一つの近似的な便法を試みた。

図 18 はこの方法を示す図である。関数 Y が変数 H_B と τ_u との二元関数である。簡単にするため $\log Y$ がそれぞれ $\log H_B$ と $\log \tau_u$ の一次関数で近似できるとする。

$$Y \propto H_B^A \cdot \tau_u^B \quad (6)$$

ただし A, B は定数。このような一次関数 Y は図 19 に示す 1 つの平面になる。このような平面を決定するためには 2 点では不十分で少なくとも一直線上にない 3 点が必要である。一連の実験データにおいて、もし H_B と τ_u が独立に変化できない場合でも、その測定点 $P_1, P_2, P_3, \dots$ が一直線上にないならば ($\log H_B$ と $\log \tau_u$ との

関係が一次関数でないならば) このような条件を満たす最適な平面を最小自乗法によって決定することができる。このようにして求めた平面の xy 面 yz 面との交線のこう配が式 (6) の指数 $A, B, \dots$ になることは明らかである。幸いにして $\log H_B$ と $\log r_u$ の関係は一次関係ではないのでこの方法を用いることができた。すなわち寿命判定基準が $V_B=0.4$ の場合 (5), (5)' においてそれぞれ

$$V \cdot T^n \cdot f^\alpha \cdot d^\beta = C \quad (5)$$

$$V \cdot T^n \cdot \exp(\delta \cdot f) \cdot d^\beta = C \quad (5)'$$

$$\left. \begin{aligned} n &\propto H_B^{0.23} \cdot r_u^{0.22} \\ \delta &\propto r_u^{-0.29} \cdot H_B^{-1.01} \\ C &\propto H_B^{-1.36} \cdot r_u^{-0.145} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

5. 結 論

以上前報²⁾ の結論が炭素鋼においても成立することを示し、かつ被削材の機械的諸性質が及ぼす寿命への効果がブリネルかたさ H_B とせん断破壊におけるひずみ r_u との2つの量で代表されること、およびそれらの影響は (7) の形の実験式で表示されることを示した。

すなわち寿命方程式 (2) の指数 n に対する影響は大略 $(H_B \times r_u)^{0.2}$ の形ででき、被削材のかたさと延伸性が大きくなるほど単調に大きくなることを意味している。これは実際上の経験とも一致する。すなわち強度の大きい粘い被削材ほど n が大きく、もろい被削材ほど n

は小さい傾向がある⁷⁾。また δ への効果はかたさの影響が大きく、 C はほとんどかたさのみで決定するごとく思われる。(7) にかかげた C の関数の指数も 2.2.2 に述べた ϵ_1, ϵ_2 と近接する値である。

したがって便法によって導いたにすぎない (7) の実験式もかなり事実を表示しているものと考えられる。

(1963, 6月30日受付)

文 献

- 1) A. S. M. E : Manual on cutting of metals, 1939.
海老原：マシンリー, No.7, (1950)
竹山ほか：切削作業標準設定に関する研究, 精密機械, 24巻 11号, p. 586, 25巻 3号 p. 62, etc.
- 2) 竹山, 村田：工具摩耗の温度依存性, 精密機械 27巻 1号, (1961) 33.
- 3) たとえば海老原：マシンリー, No. 8, (1950) 595.
- 4) 海老原, 益子：金属切削に関する研究, 機械学会誌, 49巻 337号, (昭21) 252.
- 5) たとえば竹山, 柏谷, 山田：高級耐熱鋼の旋削作業標準, 精密機械, 26巻 12号, 731.
- 6) M. C. Shaw : On the Analysis of Cutting Tool Temperatures, Trans. A.S.M.E, Feb. (1954) 217.
- 7) 村田：金属材料の性質と被削性の関連, 金属, 32巻 3号, (昭37) 48.